

磁気流体シミュレーションによる原始星への質量・磁場降着過程の研究

高棹 真介

大阪大学 大学院理学研究科

1. はじめに

星は約 1 万 au 程度の大きさのガス雲が重力収縮することで形成される (1 au は現在の地球と太陽の距離)。ガス雲を構成するガスは一般に有限の角運動量を持っているため、収縮中に遠心力の影響で多くは中心に直接落下することができず、回転円盤を形成する。つまり星の赤子に対応する原始星は、周囲に回転ガス円盤を持つ。ガス雲から星スケールまでの構造の概要については、図 1 を参照されたい。原始星は太陽質量の 1% 程度の非常に小さい質量を持って誕生し、周囲の回転ガス円盤 (以下では降着円盤とも呼ぶ) から質量・角運動量・熱・磁場を受け取りながら約 100 万年かけて成長・進化する。したがって、星形成過程を明らかにするには、円盤ガスと星の接続領域で何が起きているかを解明する必要がある。

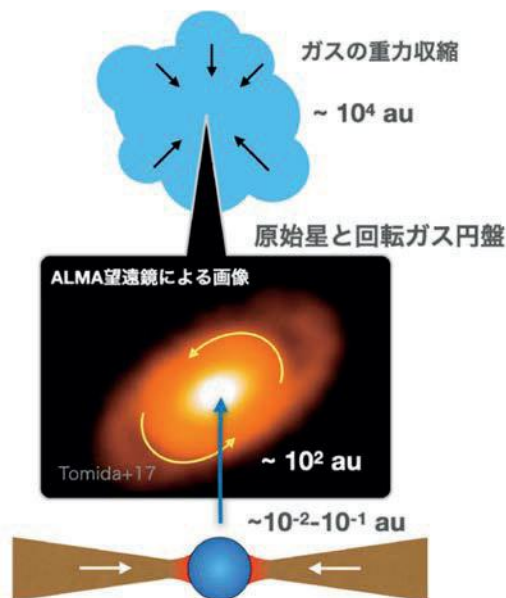


図 1：星形成領域の構造に関する概要図

円盤からのガス降着過程はガスの降着率によって大きく様相を変え、原始星の進化経路を決定

すると考えられている。図 2 に、質量降着率 (単位時間あたりに星に集積するガスの量) の異なる 2 ケースに対する星半径スケールの概念図を示している。降着率が低い場合、星表面に到達した円盤ガスは星表面に即座に取り込まれるため、降着ガスは星表面のごく一部しか覆わないであろう。しかし降着率が十分高いと降着ガスが星表面の大部分を覆ってしまうことが予想されている[1]。原始星がどの程度覆われているのかは重要で、例えば星表面の大部分が覆われていると星に熱がこもり、星半径の大きい状態が維持されやすくなる。その結果、星の年齢と明るさの関係が変わるため、観測の解釈にまで影響が及ぶ。このような背景から、原始星へのガス降着過程の理解は星形成論の完成にとって極めて重要な課題となっている。

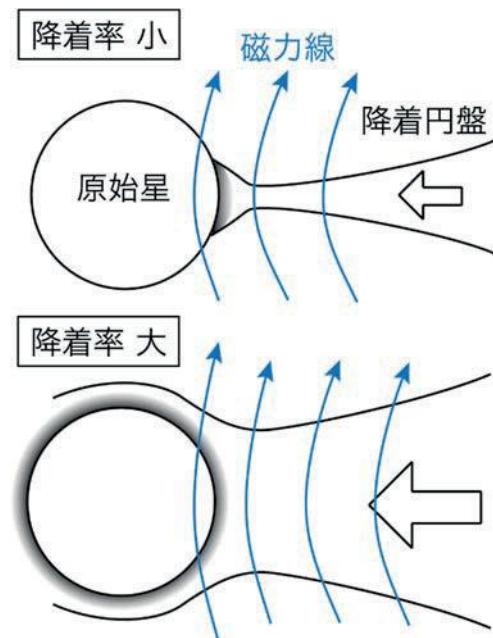


図 2：原始星と降着円盤の構造の概念図。星と円盤の自転軸に平行な面での断面図で、円盤の回転速度は奥行き方向を向いている。

回転ガス円盤中のガスが中心に落下するためには角運動量の輸送が必要であるが、星近傍での角運動量輸送の担い手は磁場である。ある程度電離したガス（プラズマ）はローレンツ力を介して磁場とカップルするため、その振る舞いは主に流体力学方程式と Maxwell 方程式を組み合わせた**磁気流体方程式**に基づいて決定される。さらに、回転円盤中に磁場があると円盤は乱流化し、その乱流が実効的な粘性を生じてガス降着を駆動することも知られている。したがって、第一原理的に原始星の成長過程を解き明かすには、磁気流体方程式を土台にした方程式を解いて、円盤乱流と星表面の構造を詳細に捉えるようなシミュレーションが求められる。

2. 計算の困難さと過去の研究について

原始星表面へのガス降着の理解が重要であるにもかかわらず、これまで多くの困難によりシミュレーション研究が阻まれてきた。原始星近傍にはガスの集積に伴って磁場も集められるが、磁気流体シミュレーションでは磁場が強くなると数値的に負の圧力が生じるなど、様々な数値不安定性が起きやすくなる。また磁場が強くなると、磁場に沿った情報伝達速度である Alfvén 速度が増大し、シミュレーションの時間刻み幅が小さくなって長時間計算が困難になる。

このような背景から、計算が困難な領域を計算領域に含めないモデルで星・円盤相互作用の研究が進められてきた。たとえば原始星と円盤の接続領域は高解像度で解くものの、低密度で負の圧力が生じやすいような円盤上層大気は計算領域に含めないようなモデルがある（円盤赤道面だけに注目したモデル）[2, 3]。しかしこのモデルには鉛直方向の物質・角運動量輸送を議論することができない問題がある。円盤上層大気や星の周囲も計算領域に含めたモデルも提案されていたが、そこでは**星表面が内側境界**として計算されていた [4, 5]。我々も星表面を内側境界とした 3 次元星・円盤モデルを独自に発展させながら、新たな降着モ

ードを明らかにしてきた[5, 6]。しかし星表面が計算領域に含まれていないので、原始星の成長・進化を決定づける原始星へのガス降着過程の最終段階が解かれていないのが現状である。

3. 本研究のアプローチ

原始星へのガス降着の最終過程を解くため、我々は**原始星表面と円盤の相互作用領域を直接解くグローバル 3 次元磁気流体シミュレーション**を初めて実行した。その結果に基づき、原始星周りの降着ガスの分布や磁場の持ち込み過程を調査した。図 3 に初期条件の概要を示す。カーテシアン座標を用い、中心に原始星であるガス球を置く。原始星の質量や半径は、原始星進化計算コード[7]の計算結果に基づき値を決めている。本研究で用いた原始星の質量は 0.5 太陽質量となっており、太陽型星のケースに対応する。原始星周囲には回転ガス円盤を置く。また、星形成時に持ち込まれた磁場を模して、円盤を貫く磁場も初期条件に設定している。計算開始後、この磁場が円盤乱流を発生させ、円盤内にガス降着を駆動することになる。

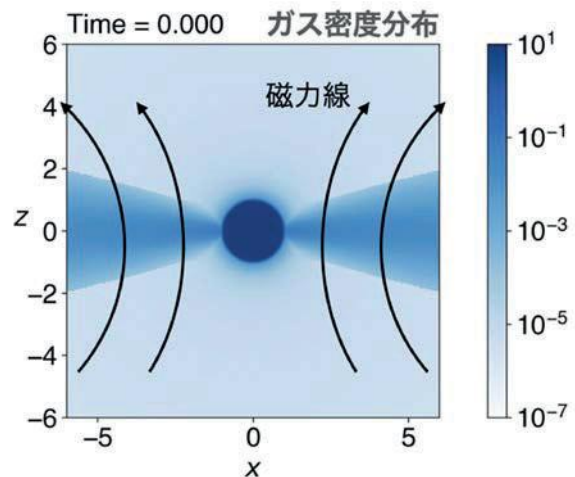


図 3：初期条件の密度分布とおおよその磁場構造

基礎方程式は放射冷却や磁気拡散を考慮した磁気流体方程式であり、数値計算には公開磁気流体コード Athena++[8]に必要な機能を追加したも

のを用いている。また計算スキームの空間補間精度と時間積分の精度はそれぞれ 4, 3 次となっている。

本計算を実行するにはいくつかの困難を緩和する必要があり、具体的には数値不安定性の抑制、極めて小さい時間刻み幅の緩和、そして大規模計算を可能にする計算資源の節約である。これらの数値的困難を緩和するために、我々は以下のような取り組みを行ってきた。

まず磁場強度の増加とともに時間刻みが小さくなり計算が進まなくなる問題に対しては、運動方程式を一部変更することで対応した。相対論的流体では Alfvén 速度が光速に近づくと変位電流由来の慣性が働き、Alfvén 速度の増大が抑えられる。原始星環境のような非相対論的流体だと変位電流は無視されるのだが、人為的に小さめの光速を設定したまま変位電流の項を残すことで、人工的に Alfvén 速度の最大値を制限することができる。この手法は Boris correction として古くから用いられている。近年我々は、Boris correction を HLLD 法[9]と呼ばれる磁気流体計算で広く使われている衝撃波捕獲法に導入するスキームを開発し、その有用性を示してきた [10]。本研究では、このスキームを用いて計算を行っている。Alfvén 速度が非常に大きくなって方程式の修正項が重要になるのは計算領域のごく一部であるため、このような修正は計算結果を大きく変えない。

他の取り組みとしては、磁場が強い領域で負の圧力が生じないようにする工夫[6]や、計算量を極力抑えるようなグリッド配置などが挙げられる。Athena++は解像度を上げたい領域でグリッドを細かく張ることができる入れ子格子をサポートしており、その機能を活用して星近傍で解像度を上げるように格子構造を設定した。

4. 結果

4.1 降着ガスの分布

まだ解析の初期段階であるが、結果の概要について述べる。図 4 は数値計算から得られた円盤と

原始星の断面図である。円盤が乱流的になっているが、これは磁気回転不安定性と呼ばれる磁場が駆動する不安定性の結果である。この乱流により円盤ガスは角運動量を外側へ輸送し、星に向かうガスの流れを生じている。磁気乱流化した円盤が原始星表面と相互作用する様子を計算した、初のグローバル計算である。

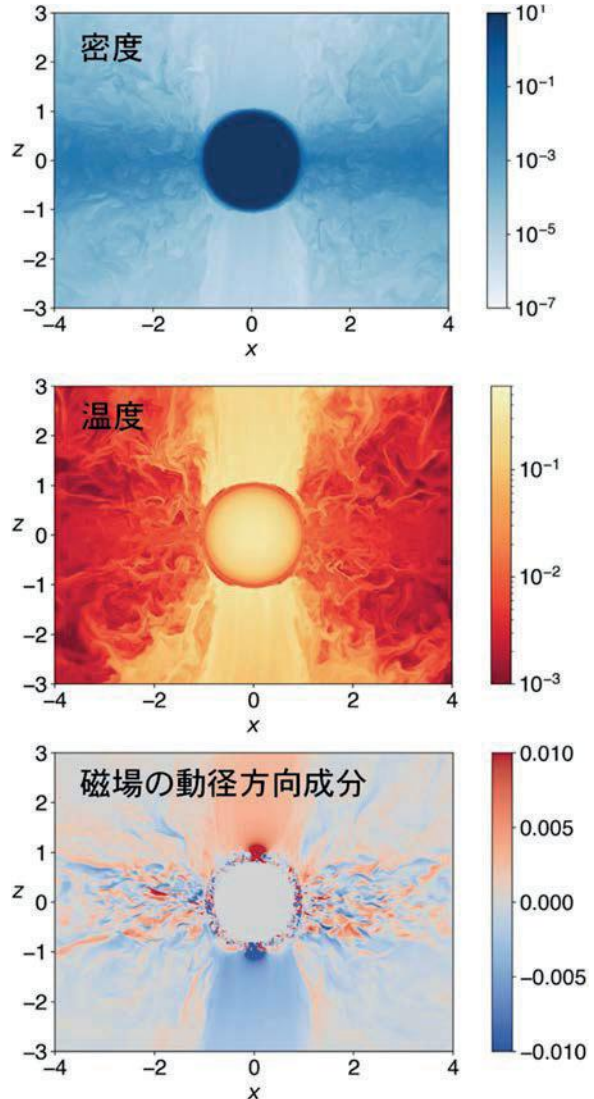


図 4 : 上から密度、温度、磁場の動径方向成分

密度分布をみると、星の南北極域で密度が低く保たれていることがわかる。その理由は、星の極域には降着してきたガスと一緒に運ばれてきた磁場が溜まっており、その磁場が降着ガスの侵入を妨げているからである。このことから、原始星の表面がどれだけ降着ガスで覆われるのかを決める要素として、磁場も本質的に重要であること

が明らかとなった。

4.2 巨大黒点の形成

降着ガスは磁場も原始星へと持ち込むため、星表面に磁場が溜まることとなる。現在考えている原始星は表面が対流的であるが、その対流のために磁場が星の極域に効率的に集まった。その結果、図 4 下で示すように極域に巨大黒点が形成された（極域に見える磁場が集中している領域）。前節で極域の低密度領域について説明したが、巨大黒点の磁場が低密度領域を形成していたのである。

5. おわりに

本研究では原始星と円盤の相互作用領域を直接解くグローバル 3 次元磁気流体シミュレーションの初期成果について紹介した。赤道面のみならず星の極域まで含めたグローバル計算を実行したことで、極域に溜め込まれた磁場の役割を見出すことができた。今後は原始星への角運動量注入過程についても考察していく。詳細な輻射輸送計算も導入することで、モデルのアップデートも進めたい。

参考文献

- (1) W. Kley & D. N. C. Lin, *The Astrophysical Journal*, 461, 933 (1996)
- (2) P. Armitage, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 330, 895 (2002)
- (3) M. A. Belyaev, et al., *The Astrophysical Journal*, 770, 68 (2013)
- (4) M. M. Romanova, et al., *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 421, 63 (2012)
- (5) S. Takasao et al., *The Astrophysical Journal Letters*, 878L, 10 (2019)
- (6) S. Takasao et al., *The Astrophysical Journal*, 941, 73 (2022)
- (7) T. Hosokawa, et al., *The Astrophysical Journal*, 721, 478 (2010)
- (8) J.M. Stone, et al., *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 249, 4 (2022)
- (9) T. Miyoshi and K. Kusano, *Journal of Computational Physics*, 208, 315 (2005)
- (10) T. Matsumoto, et al., *The Astrophysical Journal*, 874, 37 (2019)